

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗ- ЛИВКИ СТАЛИ**

*Рассмотрены свойства и функции шлакообразующих смесей в процессе непрерывной разливки стали. Разработана новая методика определения скорости плавления шлакообразующих смесей. Для определения вязкости расплавленных шлакообразующих смесей использован ротационный метод. Показана возможность использования некоторых математических моделей для определения вязкости расплавленных шлакообразующих смесей.*

Шлакообразующие смеси (ШОС) широко применяются последние 20-30 лет при непрерывной разливке стали с использованием погружных стаканов, по которым сталь поступает из промковша в кристаллизатор. Правильный выбор ШОС оказывает большое влияние, как на сам процесс непрерывной разливки, так и на качество поверхности литой заготовки.

В процессе непрерывной разливки стали ШОС выполняют следующие основные функции:

- изолируют жидкий металл от воздуха, предотвращая его окисление;
- ассимилируют неметаллические включения, всплывающие в жидком металле;
- теплоизолируют зеркало металла в кристаллизаторе и предохраняют его от чрезмерного охлаждения;
- улучшают условия теплопередачи от непрерывнолитой заготовки к водоохлаждаемым стенкам кристаллизатора;
- выполняют роль смазки между движущейся оболочкой слитка и кристаллизатором.

В результате взаимодействия ШОС с жидкой сталью, на поверхности мениска образуется слой жидкого шлака, частично спекшийся слой и неспеченная порошкообразная ШОС. Жидкий шлак из нижнего слоя поступает в зазор между затвердевающей коркой и стенками кристаллизатора. Образующийся смазочный слой уменьшает трение. Шлаковая прослойка, находящаяся в зазоре между заготовкой и кристаллизатором, выполняет две основные функции: сохранение гомогенной, соответствующим образом смазывающей пленки с подходящей вязкостью, а также обеспечение достаточно интенсивной и равномерной теплопередачи между затвердевающей заготовкой и кристаллизатором. Степень и равномерность теплопередачи от слитка к кристаллизатору через слой шлака оказывает значительное влияние как на рост оболочки слитка, так и на допустимую скорость разливки, а также на качество поверхности слитка и образование трещин.

Для выполнения указанных выше функций ШОС должна обладать определенными свойствами и характеристиками. К важнейшим свойствам ШОС относятся: температура их плавления, скорость плавления, вязкость расплавленной ШОС в интервале температур 1200-1400 °С.

Свойства ШОС зависят от их химического и компонентного состава, фракционного состава, вида подготовки (предварительное спекание, плавление или механическая смесь компонентов), содержания и вида углерода, входящего в состав ШОС. Для большого числа отечественных и зарубежных ШОС эти характеристики определены экспериментально [1 – 8]. Однако в ряде случаев мы сталкиваемся с необходимостью замены отдельных компонентов ШОС или с новыми композициями ШОС. Для оценки свойств новых ШОС или при замене отдельных их компонентов, например, теми или иными промышленными отходами, содержащими необходимые химические составляющие, приходится определять экспериментально соответствующие свойства и характеристики новых ШОС.

Температуру плавления ШОС обычно определяют методом плавления специально подготовленных цилиндрических образцов диам. 3 мм и высотой 3 мм на нагревательном мик-

роскопе (например, фирмы Leitz, модель 1A). Микроскоп позволяет производить нагрев до  $1600^{\circ}\text{C}$  и дает увеличение при визуальном наблюдении и фотографировании в проходящем и отраженном свете в 3,75; 5,4 и 11,6 раз. Образец устанавливается на керамической подставке в нагревательную печь микроскопа. В процессе непрерывного нагрева образца со скоростью  $5 - 8^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  одновременно фиксируют его температуру и форму (визуально или методом фотографии). Обычно фиксируют температуру размягчения и растекания образца, которые соответствуют началу изменения геометрической формы образца и растеканию капли по подложке.

Одной из важнейших физических характеристик ШОС является время образования шлакового расплава при контакте ШОС с жидким металлом в кристаллизаторе, т.е. скорость плавления ШОС. Её обычно определяют путем помещения определенного количества ШОС в графитовую воронку специальной формы (рис. 1), которую нагревают токами высокой частоты до  $1500^{\circ}\text{C}$ , обеспечивая направленный снизу вверх нагрев. Скорость плавления ШОС оценивают по количеству стекающего шлака за фиксированное время.

В связи с большими затратами на проведение, а также с длительностью и количеством экспериментов нами разработана более простая методика определения скорости плавления ШОС. Графитовый тигель с навеской ШОС (рис. 2) помещают в верхнюю часть печи Таммана на огнеупорную подставку. В стенке графитового тигля размещена термопара и молибденовый электрод. Второй молибденовый электрод пропускают через слой порошкообразной ШОС таким образом, чтобы между концом электрода и дном тигля было фиксированное расстояние. Нижняя часть тигля быстро нагревается до температуры

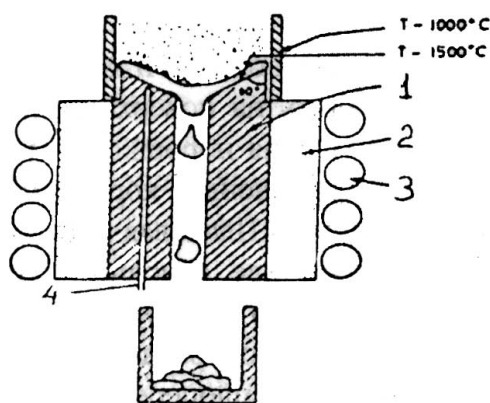


Рис.1 – Схема устройства для измерения скорости плавления ШОС с использованием индукционного нагрева: 1 – графитовый тигель; 2 – термоизоляция из глинозема; 3 – индуктор; 4 – термопара.

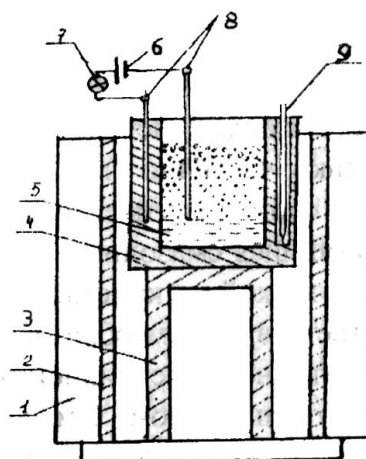


Рис.2 – Схема новой установки для определения скорости плавления ШОС: 1 – печь Таммана; 2 – графитовый нагреватель; 3 – огнеупорная подставка; 4 – графитовый тигель; 5 – жидкий шлак; 6 – источник тока; 7 – лампочка; 8 – молибденовые электроды; 9 – термопара.

$1500^{\circ}\text{C}$ . За счет градиента температур в верхней части печи Таммана, нагрев навески ШОС происходит в основном направленно, снизу вверх. По мере плавления ШОС, в нижней части тигля поднимается уровень жидкого шлака. Когда жидкий шлак касается торца молибденового электрода, замыкается электрическая цепь и зажигается лампочка. Время, прошедшее от момента, когда температура нижней части тигля достигает  $1500^{\circ}\text{C}$  и до момента загорания лампочки, служит характеристикой продолжительности плавления ШОС.

Одним из важнейших свойств ШОС, применяемых при непрерывной разливке стали, является вязкость шлака, образующегося при ее плавлении. Эта характеристика определяет условия проникновения шлака в зазор между слитком и кристаллизатором. Комбинация вязкости и температуры плавления шлака определяют условия смазки и теплопередачи в кристаллизаторе [7, 9-11].

В зависимости от состава разливаемой стали, скорости разливки, типа и сечения заготовки, оптимальные условия непрерывной разливки стали обеспечиваются при определенном значении вязкости шлака [12]. Вязкость шлака влияет также на образование «шлакового ранта» вокруг кромки мениска.

Из разнообразных методов определения вязкости расплавленных шлаков [13,14], для оценки вязкости расплавленных ШОС обычно используют вибрационный или ротационный метод. Вибрационный метод позволяет определять вязкость расплавов в широких пределах, но требует сложной аппаратуры, дефицитных материалов для изготовления пластин и тиглей, тщательной градуировки и настройки на резонанс. Более распространенным для определения вязкости расплавленных ШОС является ротационный метод. Кроме фирменных ротационных вискозиметров, часто используют устройства с вращающимся тиглем. Нами для измерения вязкости расплавленных ШОС изготовлен и используется ротационный вискозиметр (рис.3), в котором тигель с расплавом вращается с постоянной скоростью. В расплав погружен цилиндрический шпindel, подвешенный на упругой нити. Момент вращения от тигля через вязкий расплав передается шпинделю, в результате чего нить закручивается на определенный угол. При этом крутящий момент, обусловленный вязкостью жидкости, уравнивается моментом сил упругости нити.

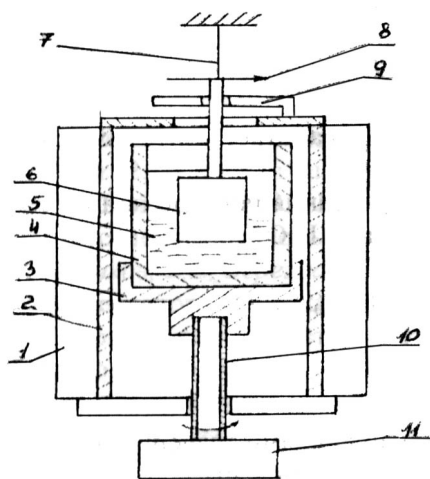


Рис.3 – Ротационный вискозиметр с вращающимся тиглем и торсионным измерителем крутящего момента:1-печь Таммана; 2-графитовый нагреватель;3-подставка; 4- графитовый тигель; 5-жидкий шлак; 6-графитовый шпindel; 7-стальная нить; 8-указатель; 9-циферблат; 10-вал вращения; 11-вращательное устройство.

Это – вискозиметр с торсионным измерителем крутящего момента. Градуировка вискозиметра производилась по жидкостям с известной вязкостью. Преимуществом такого вискозиметра, кроме простоты обслуживания, является то, что детали, работающие при

высоких температурах (тигель и шпindel), можно изготавливать из недефицитного материала – графита. Ротационные вискозиметры обеспечивают достаточно точное измерение вязкости шлаковых расплавов в пределах 0,01 – 10 Па·с.

В целом же измерение вязкости расплавленных ШОС – это очень трудоемкий процесс, требующий дорогостоящей и точной аппаратуры.

Используя данные по вискозиметрии ШОС, температурам их плавления и скорости плавления, можно заранее оценить пригодность той или иной ШОС для заданных условий разливки и марки стали.

Однако экспериментальное определение вязкости и других характеристик ШОС различного состава связано со значительными трудностями и затратами. Поэтому представляют интерес разработки, в которых оценка этих характеристик производится на основе математических моделей, которые учитывают химический состав шлака и температуру.

Для прогнозирования вязкости расплавленных ШОС наиболее часто используют полуэмпирические модели. Они имеют теоретическую основу, а при определении параметров модельного уравнения за основу берутся экспериментальные данные. Используют уравнения зависимости вязкости расплавленного шлака от температуры вида (1) или (2):

$$\eta = A * T * \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (1)$$

$$\ln \eta = \ln A + \left(\frac{B}{T}\right) \quad (2)$$

Достаточно хорошее совпадение расчетных и опытных данных было получено нами при использовании уравнения (2), в котором значения коэффициентов А и В определялось составом шлака, выраженным в мольных долях:

$$\ln A = -0,242 * Al_2O_3 - 0,061 * CaO - 0,121 * MgO + 0,063 * CaF_2 - 0,19 * Na_2O - 4,816 \quad (3)$$

$$B = -92,59 * SiO_2 + 283,186 * Al_2O_3 - 165,635 * CaO - 413,646 * CaF_2 - 455,103 * Li_2O + 29012,564 \quad (4)$$

Неплохие результаты по прогнозированию вязкости расплавленных ШОС получены нами также с использованием такой характеристики шлака, как “коэффициент структуры анионов” (КСА):

$$КСА = \frac{O^{2-} + F^{-}}{Si^{4+} + 0,75 * Al^{3+}} \quad (5)$$

$$Lg\eta = LgB + \frac{E_{\eta}}{RT} \quad (6)$$

Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что коэффициенты В и Е связаны с параметрами КСА зависимостью:

$$\lg E_{\eta} = -0,104 (КСА) + 2,455 \quad (7)$$

$$\lg B = 0,836(КСА) - 7,915 \quad (8)$$

Для конкретных температур зависимости (6) – (8) упрощаются:

$$\ln \eta = a * \ln(КСА) + b \quad (9)$$

Значения коэффициентов *a* и *b* получают статистической обработкой опытных данных [15].

В работе [16] установили связь между температурой затвердевания шлаков, при которой его вязкость резко возрастает («переломная» температура) и составом ШОС:

$$(T_{затв} - 1180)(^{\circ}C) = -3,94(\%Al_2O_3) - 7,87(\%SiO_2) + 11,37(\%CaO) - 9,88(\%MgO) + 24,34(\%Fe_2O_3) + 0,23(\%MnO) - 308,7(\%K_2O) + 6,96(\%Na_2O) - 17,32(\%F) \quad (11)$$

Расчет показывает хорошее согласие с экспериментально найденными значениями  $T_{затв}$ .

В соответствии с моделью структуры шлаковых расплавов как системы неполяризованных ионных радиусов [17], для определения связи между вязкостью расплавленных шлаков и их составом можно использовать значения комплексов модельных параметров:  $\rho$  – показатель стехиометричности системы,  $\Delta e$  – химический эквивалент системы. Вязкость расплавленных шлаков оценивают по эмпирическим уравнениям общего вида:

$$\lg \eta_T = a + b * \rho + c * \Delta e \quad (10)$$

Значения коэффициентов *a*, *b* и *c* находят статистической обработкой экспериментальных данных.

### Выводы

1. В зависимости от состава разливаемой стали, скорости разливки, типа и сечения заготовки, оптимальные условия непрерывной разливки стали обеспечиваются при определенном значении вязкости шлака.
2. Различные модели и полуэмпирические уравнения зависимости свойств расплавленных ШОС от их состава могут использоваться для предварительной оценки при разработке ШОС для непрерывной разливки стали. Для окончательной оценки свойств новых ШОС необходимо проводить их экспериментальное определение и совершенствовать соответствующие экспериментальные методы.

### Перечень ссылок

1. Лейтес А.В. Защита стали в процессе непрерывной разливки. / А.В. Лейтес. – М.: Металлургия, 1984. – 198 с.
2. Евтеева В.Ф. Применение порошкообразных шлакообразующих смесей для разливки стали на МНЛЗ. / В.Ф. Евтеева // Обзор по системе Информсталь (Ин-т «Черметинформация»). – М.: - 1984. – Вып. 31 (210), 22 с.
3. Способы защиты металла от вторичного окисления при непрерывной разливке / Ю.Б.Обманов, А.П.Шкирмонтов, И.Г.Очагова и др. // Обзор по системе Информсталь (Ин-т «Черметинформация»). М.: - 1989. – Вып.17(350).- 71 с.
4. Лукашев В.Л. Порошкообразные смеси для защиты металла при непрерывной разливке стали // Обзор по системе Информсталь (Ин-т «Черметинформация»). – М. – 1989. – Вып. 13(346), 24 с.
5. Хаазе Р. Современные шлакообразующие смеси для непрерывной разливки стали. / Р. Хаазе, Г. Шарф // Труды 5-го конгресса сталеплавыльщиков. – М.: Черметинформация, 2000. – С. 426-429.
6. Практический опыт применения шлакообразующих смесей различного химического и гранулометрического составов при непрерывной отливке слабов крупных сечений / Л.С. Лепихов, О.Б. Исаев, Н.И. Губин и др. // Труды 5-го конгресса сталеплавыльщиков. – М.: Черметинформация, 2000. – С.429-432.
7. Scheel R. Effect of different flux powder composition on continuous casting slag and casting. / R. Scheel, W. Korte // Metallurgical Plant and Technology. – 1987. – Vol.10. - №6 . – P.22-32.
8. Chudoba S. Parametry charakteryzujace jakosc zasypek stosowanych przy odlewaniu stali. Cz. 2. Wlasnosci zuzla powstajacego ze stopionej zasypki. / K. Mamro, T.Rybka // Hutnik. – 1988. - № 10. – S. 288-296.
9. Исследование зоны контакта слитка и стенки кристаллизатора / ВИ Паршин, В.И. Дождииков, В.Е. Бережанский, И.И.Шейнфельд // Сталь.- 1987. - №9. – С. 26-28.
10. Исследование механизма поступления шлакового расилава в зону контакта между оболочкой слитка и стенками кристаллизатора / Д.П.Евтеев, И.И Шейнфельд, Б.Г. Кузнецов и др. // Сталь.- 1985. - №4.- С.19-21.
11. Оптимизация процесса непрерывной разливки стали путем улучшения теплопередачи в кристаллизаторе / АМ Поживанов, В.И. Дождииков, В.М.Кукарцев и др. // Сталь. –1986. - № 7. – С.20-22.
12. Романюта В.А. Оптимизация характеристик шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали / В.А. Романюта, Е.А. Казачков // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: зб. наук. тр. – Маріуполь, 2000.- Вип. 9. – С.55-60.
13. Физико-химические методы исследования металлургических процессов / П.П.Арсентьев, В.В.Яковлев, М.Г.Крашенинников и др. – М.: Металлургия, 1988 – 511с.
14. Гладкий В.Н. Вискозиметрия металлургических расплавов. / В.Н. Гладкий. – М.: Металлургия, 1989 – 96с.
15. Романюта В.А. Математические модели вязкости расплавленных шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали / В.А. Романюта, Е.А. Казачков // Вестник Приазов. гос. техн. ун-та: Сб. науч. тр. – Мариуполь, 1999. – Вып. 8. – С.65-69.
16. Break temperatures of mould fluxes and their relevance to continuous casting / S.Sridhar, K.C.Mills, O.D.C. Afrange et al. // Ironmaking and Steelmaking. – 2000. v.27. - № 3. - P.238-242.
17. Приходько Э.В. Металлохимия многокомпонентных систем. – М. Металлургия. – 1995. – 320с.
18. Лидерфельд Х. Характеристика рабочих свойств шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали. / Х. Лидерфельд, Хессельстром Г. // Достижения в области непрерывной разливки стали. Материалы конгр. – Лондон: 1982. – М.: 1987. – С.90-98.

Статья поступила 07.05.2003